



**С. Н. Леонович**  
(S. N. Leonovich)



**Д. А. Литвиновский**  
(D. A. Litvinovskiy)

УДК 691.32:539.3/.5

## СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА ПОСЛЕ ПОЖАРА

(THE PROPERTIES OF STRUCTURAL  
CONCRETE AFTER THE FIRE)

Воздействие высоких температур на высокопрочный бетон приводит к проявлению хрупкого разрушения взрывного характера, которое необходимо прогнозировать и регулировать. С этой целью разработана методика на основе механики разрушения и предложены критерии оценки вязкости и хрупкости высокопрочного бетона и сталефибробетона для исключения взрывного разрушения при воздействии высоких температур. Выполнена экспериментальная многопараметричная оценка остаточных свойств прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона в диапазоне температур от +100 до 700°C. Предложены критерии возникновения взрывного разрушения высокопрочного бетона для изготавливаемых и эксплуатируемых конструкций в терминах силовых и энергетических параметров механики разрушения при нормальной температуре.

*Ключевые слова:* высокопрочный бетон, высокие температуры, прочность, вязкость разрушения, трещиностойкость, энергия разрушения, судебная экспертиза

**Введение.** Температурное воздействие зачастую приводит к взрывному разрушению высокопрочного бетона (ВПБ). Несмотря на целый ряд достоинств, такой бетон имеет существенный недостаток – хрупкое разрушение бетона с эффектом «взрыва».

Установлено, что количество испытаний трещиностойкости ВПБ после воздействия высоких температур недостаточно, а существующие методики сложны и трудоемки и не имеют комплексных показателей по оценке хрупкости.

### 1. Методика экспериментальных исследований.

На основе выполненного аналитического обзора сформулированы предпосылки методики экспериментальных исследований:

- прочность бетона, подвергнутого высоко-температурному нагреву и затем охлажденного до комнатной температуры, т. е. остаточная прочность, не выше прочности нагретого;

- неравновесные испытания дают вполне достоверную оценку трещиностойкости (вязкости разрушения);

- прочность бетона под нагрузкой при воздействии высоких температур выше ненагруженного.

В экспериментальном исследовании использовались четыре состава модифицированного бетона класса C50/60 (П-4) (таблица 1).

Для определения характеристик высокопрочного бетона изготавливались образцы-кубы размерами 100×100×100 мм и образцы-призмы размерами 100×100×400 мм в количестве не менее 24 штук на каждый состав.

Скорость нагрева контролировалась термопарами по толщине образцов и составляла 2°C/мин с последующим изотермическим прогревом в течение 4 часов после достижения заданного уровня нагрева: 100, 200, 300, 400, 500, 600 и 700°C.

После каждого цикла нагрева образцов и полного остывания проводился неразрушающий контроль методами упругого отскока и ультразву-

**Леонович Сергей Николаевич**, декан строительного факультета, заведующий кафедрой технологии строительного производства Белорусского национального технического университета, доктор технических наук, профессор (Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65; e-mail: sleonovich@mail.ru)

**Литвиновский Дмитрий Андреевич**, главный инженер ООО «ИнжСпецСтройПроект» (Беларусь, 220114, г. Минск, ул. П. Мстиславца, 22, пом. 210; e-mail: 7200743@gmail.com)

**Leonovich Sergey Nikolaevich**, Dean of Construction Faculty, Head of Department of Technology of Building Production of Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor

**Litvinovskiy Dmitry Andreevich**, Chief Engineer of LLC «InzhSpetsStroyProekt»

тел./tel.: +375172787512

Таблица 1. Состав бетонных смесей и их прочность на сжатие

Бетонная смесь	Расход компонентов, кг/м <sup>3</sup>			
	состав I	состав II	состав III	состав IV
Цемент ПЦ500-Д0	580	520	600	580
Щебень гранитный фракции 5-20 мм	1180	1180	1120	1120
Песок	620	570	620	620
Пластифицирующая добавка «ГП-1»	6,76	11,58	–	5,79
Микрокремнезем	–	60	–	–
Пластифицирующая добавка «С-3»	–	–	17,98	–
Фибра стальная	–	–	–	46,5
Вода	150	150	170	184
Водоцементное отношение	0,25	0,28	0,28	0,31

ковым импульсом с расчетом поверхностной твердости и модуля упругости.

Для оценки вязкости разрушения высокопрочного бетона при воздействии высоких температур разработана оригинальная методика для изготовления конструкций на одном бетонном образце, а не на образцах-близнецах, защищен-

ная патентами Беларуси и России (рисунок 1). Эта методика позволяет по величине усилия, соответствующего старту магистральной трещины в образце с надрезами, произвести расчет коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве  $K_{IC}$  и коэффициентов интенсивности напряжений при поперечном сдвиге  $K_{IIC}$  [4].

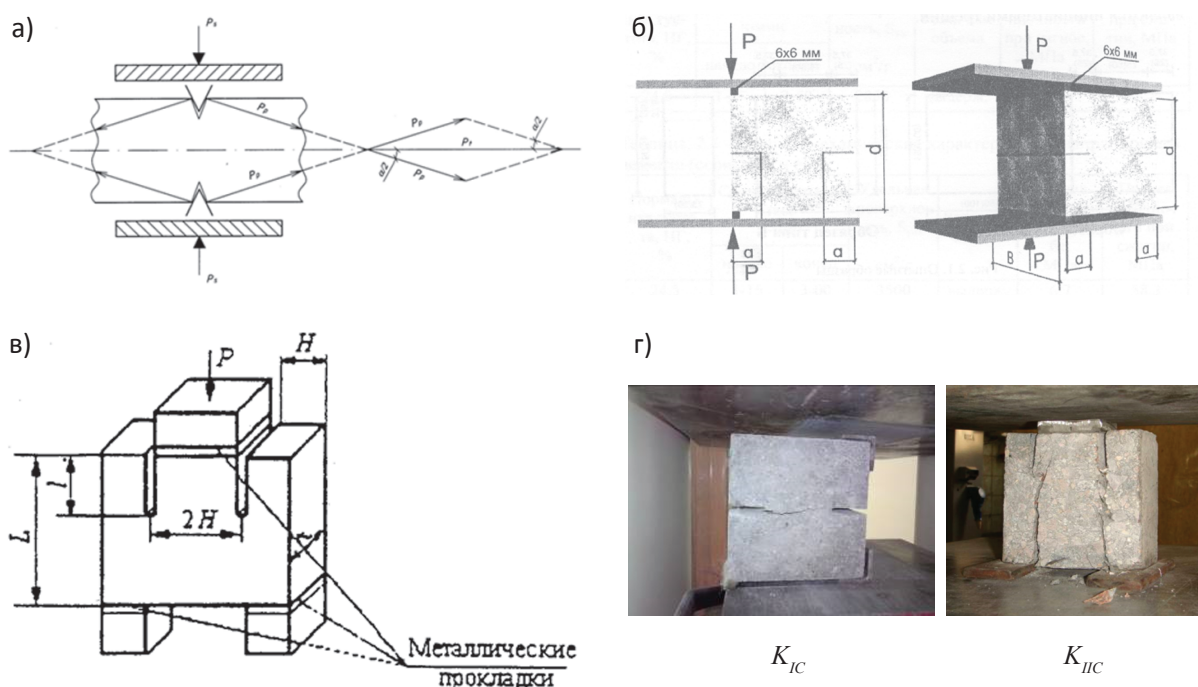


Рисунок 1. Определение коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве (а, б, г) и при поперечном сдвиге (в, г): а) Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. ВУ 19170 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. - Оpubл. 30.06.2015; б) Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. ВУ 16194 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. - Оpubл. 30.08.2012; в) Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. RU 2621623 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. - Оpubл. 06.06.2017; г) Характер излома при нагружении образцов для определения коэффициента интенсивности напряжения



Расчет выполнялся по формулам (1), (3), (4), подставляя геометрические значения образца, а также значение нагрузки, при котором происходило разделение образца на части. Значение критической длины трещины рассчитывалось по формуле (2).

$$K_{IC} = \frac{P_s}{b_s(h_s - 2a_{cr})} \cdot \left( \frac{\cos \alpha / 2 - f \sin \alpha / 2}{\sin \alpha / 2 + f \cos \alpha / 2} \right) \sqrt{\frac{2\pi k d_{\max}}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (1)$$

$$l_c = \frac{K_{IC}^2}{f_{ctm}} = \frac{2b_s(h_s - 2a_{cr})}{P_s} \cdot \frac{\pi k d_{\max}}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \left( \frac{\cos \alpha / 2 - f \sin \alpha / 2}{\sin \alpha / 2 + f \cos \alpha / 2} \right)^2, \quad (2)$$

$$K_{IC} = \frac{F_c}{b \cdot h^{1/2}} \left[ 18,3 \cdot \left( \frac{a}{h} \right)^{1/2} - 430 \cdot \left( \frac{a}{h} \right)^{3/2} + 3445 \cdot \left( \frac{a}{h} \right)^{5/2} - 11076 \cdot \left( \frac{a}{h} \right)^{7/2} + 12967 \cdot \left( \frac{a}{h} \right)^{9/2} \right], \quad (3)$$

$$K_{IIC} = \frac{P}{2tH} \sqrt{IY(l,b)}. \quad (4)$$

## 2. Результаты экспериментальных исследований характеристик высокопрочного бетона после воздействия высоких температур

### 2.1. Изменение прочности и деформативности

Изменение прочности ВПБ при нагреве происходило следующим образом (рисунок 2а): при температуре нагрева в 100°C прочность снижалась до 93-98%; при нагреве до 300°C прочность восстанавливалась до первоначальной и составляла для составов I, II и IV 105-126%; при нагреве от 400°C до 700°C прочность резко падала и составляла для составов I, II и IV до 41%; для образцов состава III с начала процесса нагрева отмечалось постоянное уменьшение прочности (составило 22% от первоначальной прочности при 700°C).

Масса образцов уменьшалась с ростом температуры и составляла к 700°C до 90% от первоначальной (рисунок 2в). Процесс потери влаги протекает в три характерных этапа: вначале интенсивная потеря с ростом Т до 200°C ввиду испарения капиллярной воды в бетоне; при изменении Т между 200 и 400°C

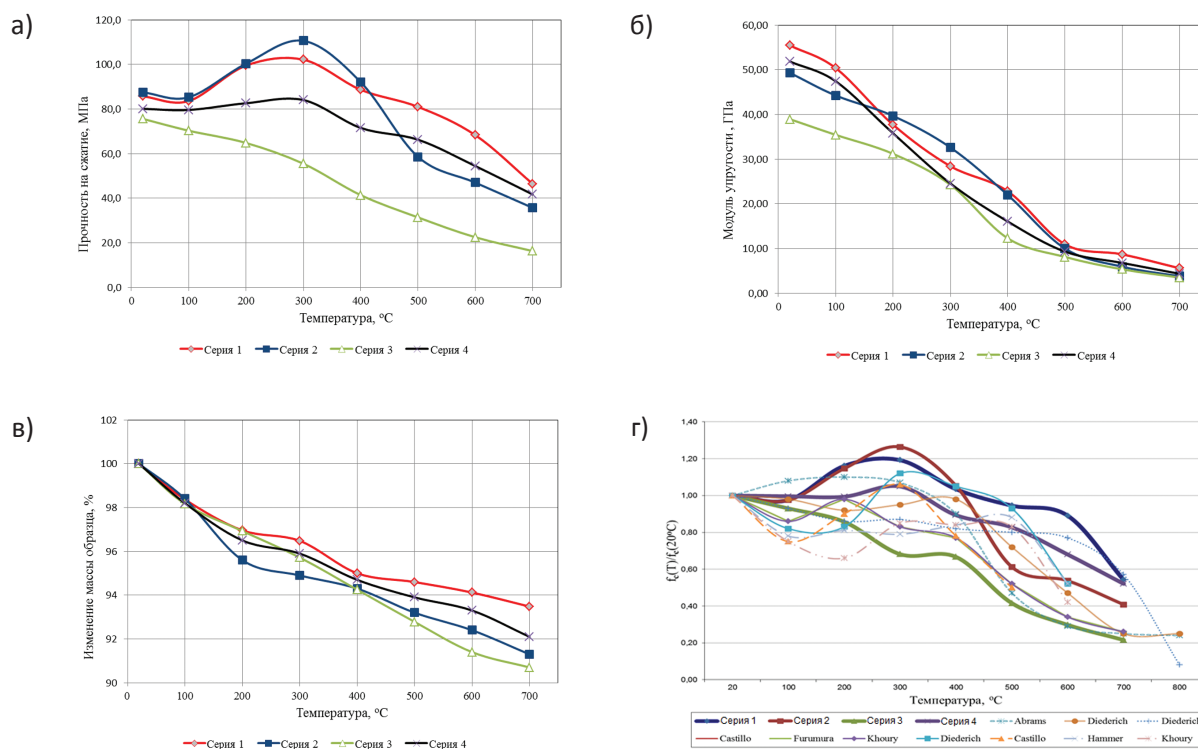


Рисунок 2. Изменение прочности на сжатие  $f_c$  (а); модуля упругости  $E$  (б); массы образцов при нагреве (в); изменение относительной прочности  $f_c(T)/f_c(20^\circ\text{C})$  (г)

скорость испарения значительно ниже ввиду трудного выделения гелевой воды; на третьем этапе (выше 400°C) потеря массы была вызвана разложением цементного камня и заполнителей (высвобождение микрохимически связанной воды).

С постоянным ростом температуры значение модуля упругости линейно уменьшается и при 700°C составляет менее 10% от первоначального значения (рисунок 26).

Предельные деформации сжатия ВПБ после нагрева до температур 200, 400 и 600°C соответственно равны 2,6; 5 и 7%. Модуль деформации при сжатии уменьшается при температуре 200°C на 20-30%, при 400°C – на 40-70%, при 600°C – на 70-90%. Установлено, что значительное снижение деформативных свойств бетона происходит в интервале температур 600-650°C, что объясняется распадом гидроокиси кальция цементного камня.

График 3г на рисунке 2 свидетельствует о том, что результаты наших исследований хорошо коррелируют с данными ведущих исследователей в этой области, поэтому обоснованно будет выполнить на образцах серий 1-4 комплекс исследований хрупкости высокопрочного бетона при высоких температурах методами механики разрушения.

## 2.2. Изменение коэффициентов интенсивности напряжений

Анализ результатов, приведенных на рисунке 3, показал, что коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге для серий 1 и 4 начинают снижаться в начале нагрева, а для серий 2 и 3 увеличиваться до температуры в 200°C. Таким образом, добавка микрокремнезем и С-3 приводят к повышению сопротивления образованию и развитию трещин при нагреве.

При температуре 100-150°C происходит химическое взаимодействие высвобождающейся воды с цементом, благодаря чему имеет место ускоренное схватывание последнего.

При температуре свыше 300°C вода из межзернового пространства постепенно проникает через оболочку новообразований к непрогидратированной части цементного зерна. Появляющиеся новообразования большего объема по сравнению с исходными материалами давят изнутри на оболочку, приводя к ее разрушению. Это приводит к формированию трещиноватой структуры, поэтому такой бетон характеризуется низкими прочностными свойствами и долговечностью.

Рабочая гипотеза локального возрастания прочности, коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве и энергии разрушения состоит в процессе «самозапаривания» бетона (по Милованову А. Ф., Прядко В. М.), в результате чего происходит уплотнение и гидратация цементного камня вследствие удаления воды из геля двухкальциевого силиката и усиленной кристаллизации

гидроокиси кальция. Вероятно, влияющими факторами будут вид и тонкость помола добавки.

## 3. Анализ результатов экспериментальных исследований

### 3.1. Феномен хрупкого разрушения

Феномен хрупкого разрушения логично рассмотреть с позиции следующих деструктивных процессов:

а) разрушающее поровое давление. Разрушение происходит при накоплении пара в порах от нагретого бетона, где влияющими факторами являются проницаемость бетона, влагосодержание и скорость нагрева;

б) растрескивание от термического нагрева. Разрушение происходит от термического воздействия, когда температурный градиент в бетоне

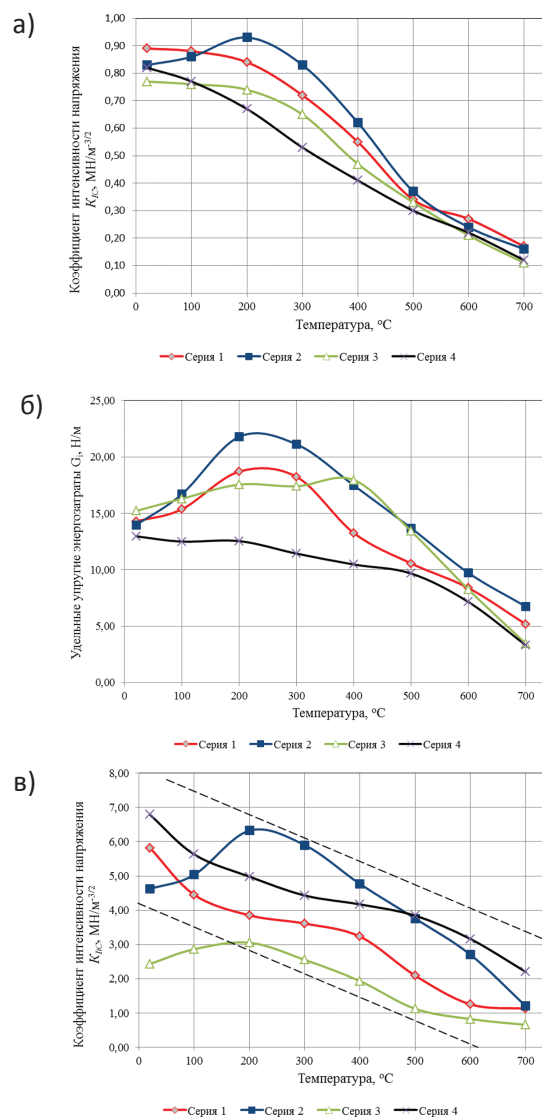


Рисунок 3. Изменение коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве  $K_{IC}$  (а), поперечном сдвиге  $K_{II}$  (б), удельных энергозатрат  $G_I$  (в)

создает сжимающее напряжение у поверхности бетона и растягивающее в более холодном участке элемента, где влияющими факторами являются расширение заполнителя, скорость нагрева и прочность бетона на растяжение;

в) совместное действие порового давления и термического нагрева. Хрупкое разрушение происходит при комбинации порового давления и термического нагрева у поверхности с образованием внутренних трещин, их развитием параллельно поверхности при высоких растягивающих напряжениях. Это сопровождается внезапным высвобождением энергии и сильным разрушением в зоне нагретой поверхности.

3.2. Радиальные и контактные трещины при нагреве

Механика разрушения в терминах коэффициентов интенсивности напряжений позволяет численно исследовать хрупкое разрушение, представляющее собой процесс, при котором происходила усадка бетона одновременно с расширением заполнителя. Решена задача образования радиальных трещин (нормального отрыва), возникновение которых связано с разницей модулей упругости и коэффициентов линейного расширения зерен заполнителя и цементно-песчаного раствора (рисунок 4). Вклад радиальных и тангенциальных растягивающих напряжений в бетоне при нагреве оценен с использованием аналитических решений Перлмана А. и Си Дж.

Коэффициент интенсивности напряжений определяется из выражения:

$$K_{I,t} = p \sqrt{\pi l} \frac{[1 - \alpha(r)] f(1/R)(M - R)^2}{(M - R)^2 - r^2} (1 + g), \quad (5)$$

где  $R$  – средний радиус зерна заполнителя;  $M$  – расстояние между зернами;  $l$  – длина радиальной трещины;  $p$  – давление.

Для оценки напряженного состояния в контактной трещине на границе крупного заполнителя и цементно-песчаного раствора при нагреве использовано решение Перлмана А. и Си Дж. для всестороннего растяжения пластины с круговым включением и трещиной на линии раздела сред (рисунок 5), где коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге рассчитываются по формулам:

$$K_{I,t} = 2p(1 - \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \cdot \{G_1(1 + X_2)[G_1(1 + X_2) + G_2(1 + X_1)] \cdot e^{\beta(\theta + \pi)}\} / \{(G_1 + G_2 X_1)[G_2(1 + X_1) + 2G_1(1 + X_2)] - G_2(1 + X_1)(G_2 + G_1 X_2)(\cos \theta - 2\beta \sin \theta) e^{-2\beta \theta}\}, \quad (6)$$

$$K_{II,t} = 2pR^\beta(1 + \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \cdot \{G_1(1 + X_2)[G_1(1 + X_2)] + G_2(1 + X_1) \cdot (1 - 2\beta) \cdot e^{\beta(\theta + \pi)} \cdot e^{-\beta \ln 2 \sin \theta}\} / \{(G_1 + G_2 X_1)[G_2(1 + X_1) + 2G_1(1 + X_2)] - G_2(1 + X_1)(G_2 + G_1 X_2) \cdot (\cos \theta - 2\beta \sin \theta) e^{-2\beta \theta}\}, \quad (7)$$

где  $\beta = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \ln \alpha$ ;  $\alpha = \frac{G_1 + G_2 X_1}{G_2 + G_1 X_2}$ ;  $G = E / 2(1 + \mu)$  – модуль сдвига;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $X = (3 - 4\mu)$  – для плоской деформации;  $X = (3 - \mu) / (1 + \mu)$  – для обобщенного плосконапряженного состояния.

Исследование хрупкости методами механики разрушения позволяет развить представление о растрескивании и разрушении высокопрочного бетона и разработать новые особо прочные и пластичные материалы для проектирования на требуемый срок службы.

3.3. Рабочая гипотеза и механизм взрывного растрескивания

Нами исследованы механизм и природа взрывного растрескивания, влияющие факторы (избыточное увлажнение, дегидратация ВПБ). Поскольку бетон с микрокремнеземом является более плотным, то

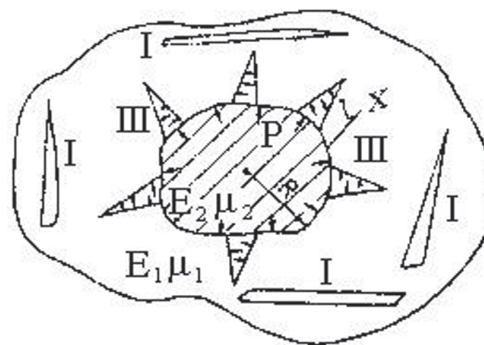


Рисунок 4. Радиальные трещины возле заполнителя

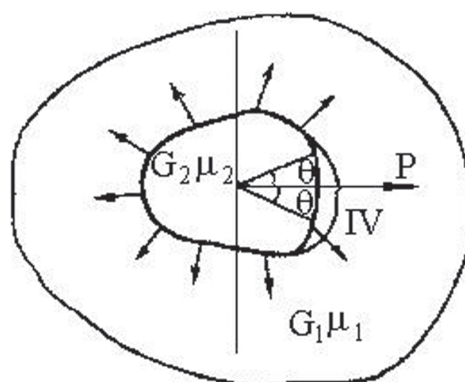


Рисунок 5. Контактные трещины на границе «зерно заполнителя – матрица»

закупоривание пара в порах и высокое давление пара могут стать причиной растрескивания.

Хрупкое разрушение носит катастрофический характер при температуре свыше 300°C, характеризуется взрывным непредсказуемым разрушением материала, оголяет защитный слой бетона армированных конструкций, вследствие чего прямое воздействие высокой температуры на арматуру ускоряет разрушение целостности конструкции.

Причины такого разрушения в ВПБ при нагреве – его влагосодержание, состав и структура, напряженно-деформированное состояние, вызванное давлением пара в замкнутых порах бетона, а также скорость нагрева и приложения нагрузки.

3.4. Критерии хрупкого разрушения высокопрочного бетона при нагреве

В нормативных документах для анализа хрупкости бетонов обычной прочности в настоящее время используют формулу Жукова В. В. для расчета хрупкого разрушения  $F$ :

$$F = \frac{\alpha_F \alpha_{bt} \beta}{K_{IC} \lambda_k} \cdot \frac{E \rho_0 W_3}{n_p}, \quad (8)$$

где  $\alpha_F$  – коэффициент пропорциональности:  $\alpha_F = 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{5/2} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $\alpha_{bt}$  – коэффициент температурной деформации расширения бетона, °C<sup>-1</sup>;  $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/(м·°C);  $\beta$  – коэффициент изменения модуля упругости бетона при нагреве;  $E$  – модуль упругости бетона при нормальных условиях, МПа;  $\rho_0$  – плотность бетона в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;  $n_p$  – общая пористость бетона, %;  $K_{IC}$  – критический коэффициент интенсивности напряжения, МН/м<sup>3/2</sup>;  $W_3$  – объемная эксплуатационная влажность бетона, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\square$  – текущие значения Литвиновского Д. А., Леоновича С. Н.;  $\triangle$  – параметры Жукова В. В.

Критерий хрупкости  $F$  на основе текущих (для температур 20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700°C) значений  $K_{IC}$ ,  $E$ ,  $\rho_0$ ,  $W_3$ ,  $n_p$ , полученных авторами экспериментально, графически представлен на рисунке 6. На основе анализа экспериментальных исследований предложены критерии хрупкости для ВПБ при высоких температурах и рекомендованы их пороговые значения (таблица 2), которые определяются по разработанной методике для бетона при  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Для эксплуатируемых конструкций разработана специальная комплексная многопараметрическая методика на основе испытания бетона методом упругого отскока (прибор «ИМП-1Б»)

Таблица 2. Рекомендуемые значения критериев хрупкости при нормальной температуре (при  $t = 20^\circ\text{C}$ )

$K_{IC}$ , МН/м <sup>3/2</sup>	$G_p$ , Н/м	$l_c$ , м
> 0,8	> 14	≥ 0,03

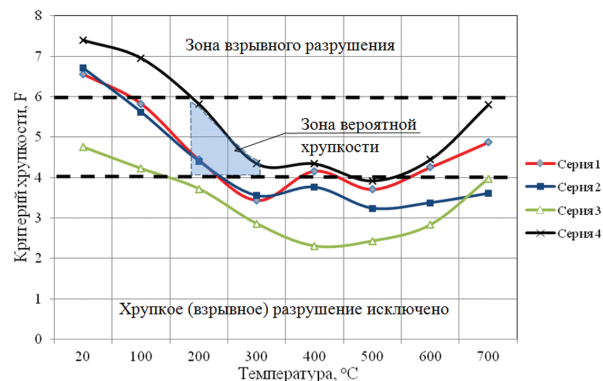


Рисунок 6. Значения критерия хрупкости  $F$

с апробацией на высокопрочных бетонах после воздействия высоких температур на базе научно-исследовательской лаборатории промышленного и гражданского строительства Белорусского национального технического университета совместно с лабораторией контактно-динамических методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси. Прибор «ИПМ-1Б» внесен в реестр средств измерений Республики Беларусь.

Критерии хрупкости для ВПБ при высоких температурах для эксплуатируемых конструкций определяются на основе зависимости  $E$  и  $K_{IC}$  от поверхностной твердости  $H$  (рисунок 7).

На основании полученных экспериментальных данных предложено значение поверхностной твердости (при  $t = 20^\circ\text{C}$ ) ВПБ  $H > 450$  МПа, при нагреве которого будет происходить хрупкое разрушение.

**Закключение.** 1. Предложены новые с ясным физическим смыслом критерии возникновения взрывного разрушения высокопрочного бетона

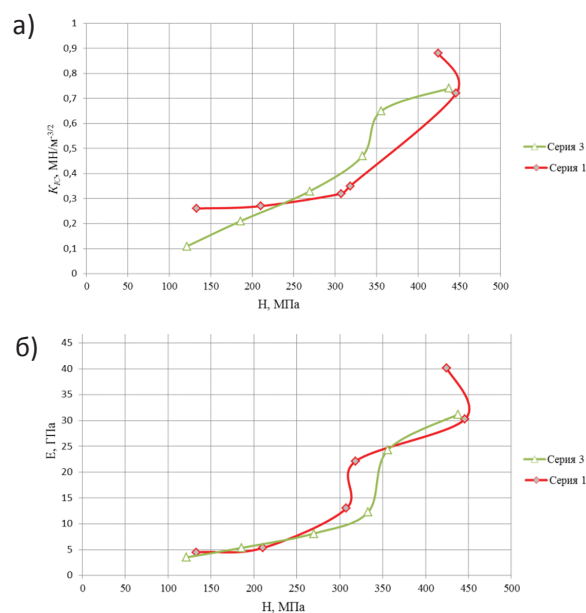


Рисунок 7. Зависимость модуля упругости  $E$  (а) и  $K_{IC}$  от поверхностной твердости  $H$  (б)



(для изготавливаемых конструкций) в терминах силовых и энергетических параметров механики разрушения, значения которых соответствуют  $G_i > 14 \text{ Н/м}$ ;  $K_{IC} > 0,8 \text{ МН/м}^{3/2}$ ;  $l_c \geq 0,03 \text{ м}$  при нормальной температуре.

2. Для эксплуатируемых конструкций специально разработана методика неразрушающего контроля, позволяющая определить поверхностную твердость бетона  $H$ , а через нее по оригиналь-

ным экспериментальным зависимостям рассчитать требуемые критерии  $E$  и  $K_{IC}$ .

3. Разработаны оригинальные методы экспериментального определения коэффициентов интенсивности напряжения при нормальном отрыве и поперечном сдвиге высокопрочного бетона, подвергнутого воздействию высоких температур, подтвержденные патентами на изобретение Республики Беларусь.

### Список литературы

1. Леонович, С. Н. Аналитические зависимости прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона при нагреве / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский // Вестн. БНТУ. - № 4. - 2011. - С. 30-34.
2. Мацулевич, О. В. Определение модуля упругости бетона методом динамического индентирования / О. В. Мацулевич, В. А. Рудницкий, Д. А. Литвиновский // Неразрушающий контроль и диагностика. - № 4. - 2012. - С. 46-56.
3. Зайцев, Ю. В. Высокопрочный бетон при высоких температурах: характеристики вязкости разрушения / Ю. В. Зайцев, С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский // Вестн. отд-ния строит. наук РААСН. - Т. 1. - Вып. 14. - 2010. - С. 55-60.
4. Леонович, С. Н. Механика разрушения термически поврежденного бетона / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский // Сб. науч. тр. Ин-та строительства и архитектуры / Моск. гос. строит. ун-т; редкол.: Н. И. Сенин [и др.]. - М., 2009. - С. 26-30.
5. Leonovich, S. N. On the tensile behavior of thermally-damaged concrete / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy // Concrete and concrete structures: proc. of the 5th intern. conf., Žilina, 15-16 Oct. 2009 / Univ. of Žilina. - 2009. - P. 139-146.
6. Леонович, С. Н. Хрупкость и высущивание бетона при высоких температурах / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский // Современные строит. м-лы: сб. тр. науч. чт. / Моск. гос. строит. ун-т; редкол.: Е. А. Король [и др.]. - М., 2009. - С. 126-145.
7. Leonovich, S. N. The influence of multilayered nanotubes on fracture toughness / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy, J. Eberhardsteiner, G. I. Yakovlev, G. N. Pervushin // Нанотехнологии для экологичного и долговечного строительства: сб. тр. IV Междунар. конф. / Ижев. гос. техн. ун-т; науч. ред. Г. И. Яковлев. - Ижевск, 2012. - С. 57-63.
8. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. BY 16193 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. - Опубл. 30.08.2012.
9. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. BY 16194 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. - Опубл. 30.08.2012.
10. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона: пат. BY 19170 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский. - Опубл. 30.06.2015.

### Literature (transliterated)

1. Leonovich, S. N. Analiticheskie zavisimosti prochnostnyh, deformativnyh, silovyh i energeticheskikh parametrov vysokoprochnogo betona pri nagreve / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy // Vestn. BNTU. - № 4. - 2011. - S. 30-34.
2. Maculevich, O. V. Opredelenie modulya uprugosti betona metodom dinamicheskogo indentyrovaniya / O. V. Maculevich, V. A. Rudnickij, D. A. Litvinovskiy // Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika. - № 4. - 2012. - S. 46-56.
3. Zajcev, Ju. V. Vysokoprochnyj beton pri vysokih temperaturah: harakteristiki vjaskosti razrushenija / Ju. V. Zajcev, S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy // Vestn. otd-nija stroit. nauk RAASN. - T. 1. - Vyp. 14. - 2010. - S. 55-60.
4. Leonovich, S. N. Mehanika razrushenija termicheski povrezhdennogo betona / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy // Sb. nauch. tr. In-ta stroitel'stva i arhitektury / Mosk. gos. stroit. un-t; redkol.: N. I. Senin [i dr.]. - M., 2009. - S. 26-30.
5. Leonovich, S. N. Hrupkost' i vysushivanie betona pri vysokih temperaturah / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy // Sovremennye stroit. m-ly: sb. tr. nauch. cht. / Mosk. gos. stroit. un-t; redkol.: E. A. Korol' [i dr.]. - M., 2009. - S. 126-145.
6. Sposob opredelenija kriticheskogo koeficienta intensivnosti naprjazhenija vysokoprochnogo betona: pat. BY 16193 / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy. - Opubl. 30.08.2012.
7. Sposob opredelenija kriticheskogo koeficienta intensivnosti naprjazhenija vysokoprochnogo betona: pat. BY 16194 / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy. - Opubl. 30.08.2012.
8. Sposob opredelenija kriticheskogo koeficienta intensivnosti naprjazhenija vysokoprochnogo betona: pat. BY 19170 / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy. - Opubl. 30.06.2015.

### Abstract. Keywords

High-strength concrete (HSC) exposure to high temperature can lead to brittle failure. It is vital to predict and control such type of failure. For this purpose, a fracture-mechanics-based method has been developed and the criteria for estimation of brittleness and fracture toughness of high-strength concrete (HSC) and steel fibered high-strength concrete (SFHSC) have been worked out to prevent brittle failure (spalling) when exposed to high temperature. Experimental multi-parameter estimation of residual strength parameters, stress-strain parameters, loading rate and energy parameters of high-strength concrete exposed to high temperature in the range of +100 to 700°C has been carried out. There have been suggested the criteria for the susceptibility of built-up and used high-strength concrete structures to explosive spalling with due regard to fracture mechanics, i.e. loading and energy parameters when exposed to regular temperature.

**Keywords:** high-strength concrete (HSC), high temperature, toughness, fracture toughness, crack resistance, energy of failure, forensic examination

Дата поступления: 23 июня 2017 г.